

INTERACCION DINAMICA VEHICULO-VIA-ESTRUCTURA-CIMIENTO EN PUENTES DE FERROCARRIL

R. Alvarez, J. Molina, M. Doblaré, E. Alarcón

Cátedra de Estructuras E.T.S.I.I U.P.M.

Resumen.- Se presenta en este trabajo, un programa de ordenador para la resolución del problema de interacción dinámica terreno-estructura-vehículo-cimiento en el caso particular de puentes de ferrocarril al paso de éste por aquel.

El programa, escrito en FORTRAN V, se ha implementado en un ordenador UNIVAC 1108 y consta de aproximadamente 100 subrutinas y base.

El objeto último del proyecto corresponde al establecimiento de una normativa adecuada referente a la rigidez de puentes de ferrocarril, en orden a limitar las vibraciones producidas en los elementos del vehículo (incluido el

pasajero) y con ello incrementar la confortabilidad. Para ello se preve, en una segunda fase, un detallado estudio paramétrico de la influencia que sobre los aspectos anteriores tienen cada una de las variables que intervienen en el proceso.

En el método de analisis, es de destacar el estudio del comportamiento del conjunto via-baño, en el que se incluyen, por ejemplo, sobre la propia deformación global inducida por los movimientos de las vigas del puente, el efecto de deformación local producido por el paso de las ruedas del vehículo. Asimismo lo es la completa modelización de los vehículos, vigas soportes y terreno con una gran variedad de elementos particulares de comportamiento para la resolución de la mayoría de los problemas presentados.

INTRODUCCION

El problema del comportamiento dinámico del sistema formado por el puente de ferrocarril y el propio tren al paso de éste, ha sido desde antiguo uno de los problemas básicos de la Ingeniería Civil. (Ver [19] para una bibliografía clásica).

Hasta la llegada de los ordenadores, y debido a la complejidad del problema, todos los intentos de resolución precisaban de importantes simplificaciones, que redujeran el número de variables, de forma que el sistema pudiera abordarse analíticamente.

A nivel práctico, el puente se diseñaba de acuerdo a unas hipótesis de carga mayoradas resultado de multiplicar la carga estática actuante, por unos coeficientes que pretendían recoger el efecto dinámico existente.

Hoy día, gracias a las posibilidades que ofrecen los modernos sistemas informáticos, es posible abordar el problema completo, lo que implica logicamente una mayor precisión y fiabilidad de los resultados. En este sentido se inscribe el programa objeto de este trabajo.

El objetivo último que se pretende conseguir es la obtención de una herramienta de trabajo cómoda, que permita un estudio completo del sistema. Para ello han de ser características prioritarias del programa, una entrada de datos relativamente sencilla y un tratamiento exhaustivo de las variables. Es fácil comprender que

ambas necesidades se contraponen, por lo que se ha buscado un compromiso aceptable entre ellas.

Los siguientes epígrafes se centran en la descripción, si bien de forma breve, de la modelización empleada, el planteamiento teórico seguido, así como de algunos aspectos concretos que, se piensa, son originales. Por último se dará una visión general del esquema del programa.

Dentro de esos apartados específicos mencionados, son de resaltar, en primer lugar, la propia amplitud del modelo, que recoge una gran cantidad de variables. Es evidente la dificultad de apreciar "a priori" la importancia relativa de cada una de ellas, pero solo el hecho de considerarlas posibilita un posterior estudio paramétrico del problema, importante en sí mismo y que justifica el esfuerzo. Por otra parte, dicho estudio aportará un claro elemento de juicio con vistas a la necesidad de considerar o no determinados parámetros, lo que permitirá realizar posteriormente una reducción sustancial en la entrada de datos.

Se ha procurado además que cada elemento del modelo se ajustase lo más fielmente posible, al comportamiento real en el sistema. Ello es fácilmente apreciable en la variedad de elección de que se dispone en cuanto a muelles, topes, amortiguamientos (hasta 4 tipos distintos en cada uno), posibilidad de pretensado en las vigas, geometría de éstas y de los pilares, etc.

Original es también la opción de modelar tantos vehículos como se desee. Asimismo, cada uno de ellos puede incorporar tantos elementos como se consideren necesarios, encontrándose la única limitación en la propia capacidad del sistema informático disponible. Ello es importante, por cuanto no limita el estudio, como en trabajos anteriores, al problema de la estructura del puente.

Este último puede estar constituido por tantos tramos como realmente posea, (cada uno con sus características propias), abordándose el cálculo de cada una de las vigas a través del método de RAYLEIGH-RITZ, constituyendo un parámetro de entrada el número de modos que se desean utilizar.

Respecto a la vía, se han adoptado como funciones de forma, convenientemente normalizadas, las de la viga continua sobre apoyo elástico sometida a diversas hipótesis de carga (carga puntual, que modeliza el efecto de cada rueda, y cargas repartidas uniformes, lineales o senoidales, que modelan el efecto que, sobre la vía, ejercen los modos de deformación de las vigas).

Con todo lo anterior, el programa puede ser utilizado también, con un mínimo de cambios en las interpretaciones, al modelado de cualquier automóvil circulando sobre un piso de características diversas.

Con respecto al proceso de cálculo, se detallara en epígrafes siguientes, el tratamiento de integración de las ecuaciones no-lineales a través del método de la aceleración media, así como el cálculo, almacenamiento y modificación de las matrices que rigen el comportamiento del sistema en cada incremento de tiempo.

En cuanto al sistema informático, se ha empleado un ordenador UNIVAC 1108, con una capacidad de memoria disponible inicialmente de 64 K-palabras de 36 bits. En el futuro se estudia la posibilidad de adaptarlo, mediante las modificaciones oportunas, a un microordenador, lo que explica la limitación de memoria utilizada. El lenguaje utilizado ha sido el FORTRAN V, ya que resulta en la actualidad el de mayor universalidad en problemas técnicos, y permite por tanto una mayor independencia del sistema concreto empleado.

Por último hemos de decir, que la importancia del estudio deriva de la del problema tratado, y su aplicación más inmediata la modificación y completación de la normativa actual al respecto, aportando unos coeficientes más realistas. En este sentido conviene quizás aclarar que la norma legal española data ya de algunos años y resulta muy conservadora en comparación con sus homólogas europeas.

MODELO DEL SISTEMA

En la Fig. 1 se observa una descripción general del modelo utilizado, que es, como puede verse, un sistema plano, constituido por el conjunto pilas-puente-balasto-vía apoyado sobre el terreno y soportando el vehículo.

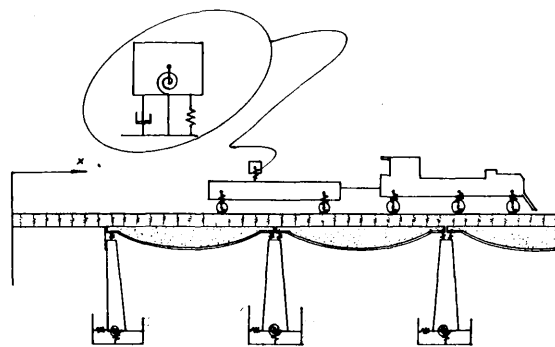


Fig. 1

Cada vehículo se representa por un conjunto de sólidos rígidos, conectados entre sí a la vía, a través de muelles y amortiguamientos, que avanza longitudinalmente a la velocidad constante del tren. Estos sólidos se encuentran sometidos a su propio peso y otras cargas externas, además de las inducidas por la elongación de los elementos que sobre ellas inciden.

Estos sólidos rígidos pueden ser de dos tipos, que responden a la denominación de "masas suspendidas" y "masas no suspendidas". Las segundas se identifican con las ruedas del vehículo, yendo por tanto apoyadas sobre la vía, a través de un elemento (tope - o muelle generalizado de tipo tope -), que no ofrece resistencia a la tracción, permitiendo por tanto que la rueda se separe de la vía en forma de salto (físicamente se observa que, en algunos casos, el rebote de las ruedas las despegue de la vía). Este tipo de masas solo poseen un grado de libertad, que corresponde al desplazamiento vertical, por lo que solo podrán actuar sobre ellas fuerzas aplicadas sobre su C.D.G.

Las masas suspendidas se encuentran, por el contrario, apoyadas sobre las no suspendidas o sobre otras suspendidas, mediante muelles y amortiguamientos de distintos tipos. Cada masa de este tipo posee dos grados de libertad: desplazamiento vertical de su C.D.G. y giro alrededor de este, pudiendo en definitiva actuar sobre ellas fuerzas verticales y momentos externos situados a cualquier distancia del C.D.G., que, como en el caso anterior, pueden ser estáticos o variables en el tiempo.

Conviene indicar que el modelo masa concentra da no implica limitación seria respecto a la posibilidad de modelar la flexibilidad de las cajas si ello se estima necesario. En efecto bastaría entonces interpretar las nuevas masas como un proceso de discretización tipo Rayleigh-Ritz semejante al de las vigas del puente.

En cuanto a los muelles, se consideran ca -
rentes de masa y aplican una fuerza o momento, -
dependientes del desplazamiento o giro relativo -
de las masas que une, respectivamente. Dependien -
do de la ley $F-x$, representativa del comporta -
miento del elemento, estaremos en presencia de -
uno de los tipos de muelle, que en este trabajo -
se consideran (vease Fig. 2).

con la deformada, convenientemente normalizada, -
de una viga de longitud infinita sobre apoyo -
elástico y sometida a una carga puntual. Estas -
funciones de forma acompañan a cada una de las -
ruedas, de forma que varían su posición a lo lar -
go del tiempo en una forma conocida de antemano -
(vease fig. 3). La filosofía subyacente es seme -
jante a la de elementos finitos "móviles".

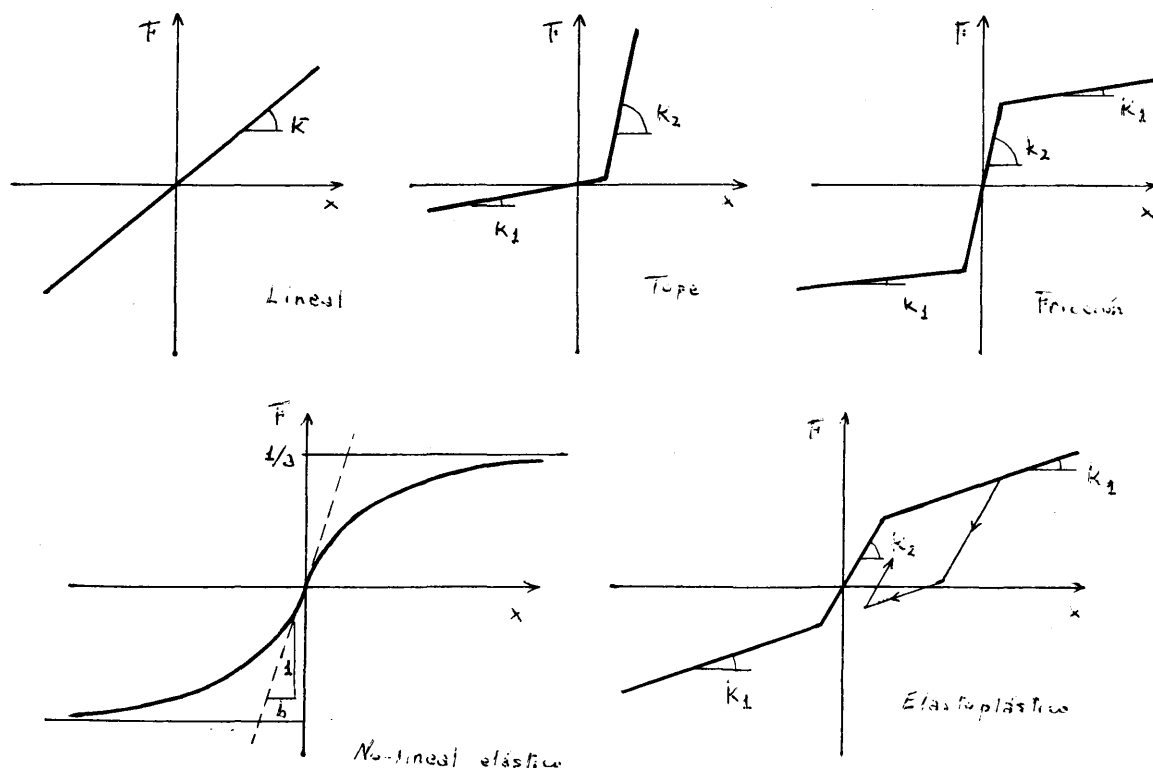


Fig. 2.- Tipos Generales de Muelles

Otro posible elemento de unión de masas co -
rresponde a los amortiguamientos viscosos, que -
proporcionan fuerzas o momentos dependientes de -
la velocidad lineal o angular relativas de los -
elementos que unen. Pueden ser asimismo lineales, -
no-lineales elásticos o elastoplásticos y sus le -
yes son idénticas a las de los muelles correspon -
dientes.

Siguiendo un orden descendente, la vía se mo -
deliza como viga sobre apoyo elástico, que se -
identifica con el balasto sobre las vigas del -
puente.

Lograr definir el comportamiento de la vía -
con un número pequeño de grados de libertad es -
realmente tarea difícil. Se utilizan para ello -
funciones de forma que reflejen el efecto del pa -
so de una rueda del vehículo y otras la flexión -
general de la vía. Las primeras se corresponden -

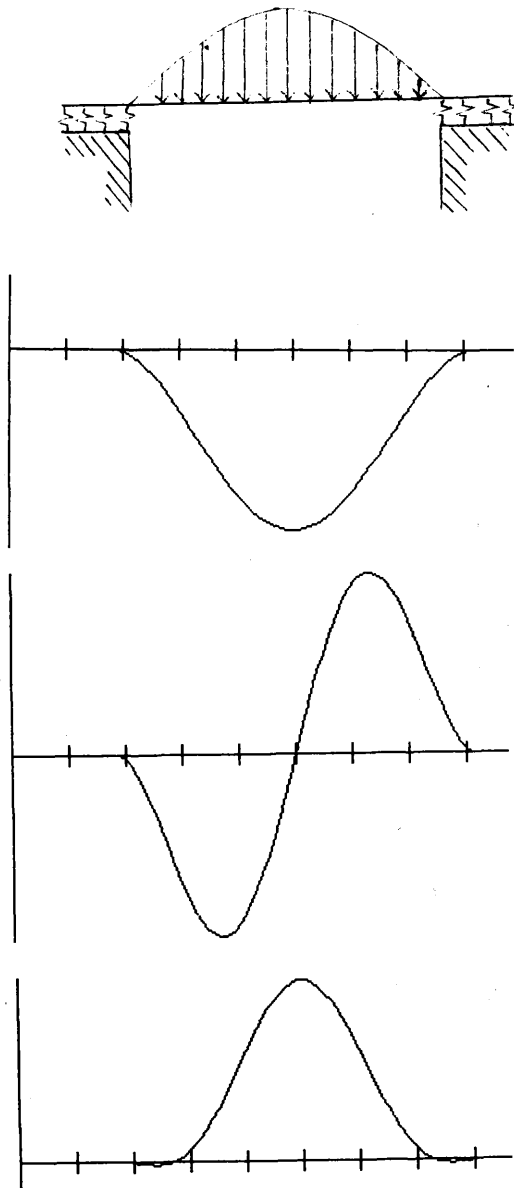


Fig. 3.- Función de Forma de la Vía para una Rueda.

En cada tramo del puente se añaden a las ante -
riores una serie de funciones de forma fijas que -
representen la influencia sobre la vía de la de -
formación del puente. En el presente trabajo se -
han desarrollado dos familias de este tipo, tales

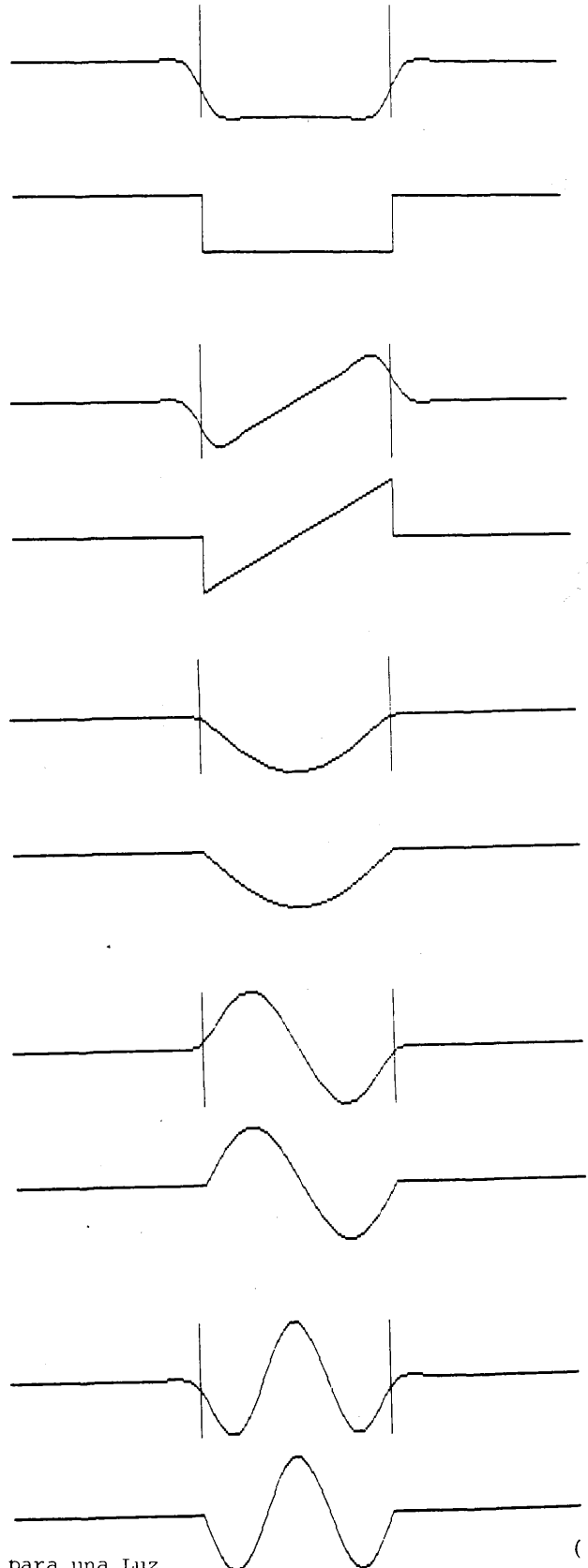
que, para ambas, se verifica que la función es -
del tipo C^3 , como es de esperar cuando no se -
aplican cargas puntuales en una viga sobre sopor-
te elástico.

La primera familia se obtiene por aplicación
de una serie de cargas (constante, lineal, senoi-
dales, etc) a una viga de longitud infinita que
se encuentra sobre un apoyo elástico excepto ba-
jo la longitud de aplicación de la carga. En la
Fig. 4a se puede observar algunas de las funcio-
nes obtenidas.



(a)

El segundo conjunto de funciones de interpo-
lación se obtiene por aplicación de una familia
de desplazamientos (constante, lineal, senoidal,
etc.) de la base rígida del soporte elástico de
la vía. En la Fig. 4b se han dibujado algunas de
las funciones calculadas, junto al desplazamien-
to que las provocó.



(b)

Fig. 4.- Funciones de Forma de la Vía para una Luz

Es de destacar asimismo la posibilidad de tratamiento de irregularidades geométricas de la vía, o de las propias ruedas, mediante la consideración de modificaciones conocidas en el desplazamiento de la vía en cada punto lo que introduce factores adicionales en el vector de cargas.

En la Fig. 1 se observaba también la aparición de unas ciertas longitudes de vía antes y después del puente. Su misión consiste en facilitar la introducción de unas condiciones iniciales y finales realistas, esto es, cuando el tren entra o sale del puente ya debe haber alcanzado un régimen estable independiente de la exactitud de las condiciones iniciales supuestas. Si bien puede objetarse que esta es una solución poco práctica, debido al incremento del tiempo de computación requerido, no es menos cierto que la medida de las condiciones iniciales reales del tren a su llegada al puente resulta ser bastante más complicada. Por otra parte, y como ya se indicó anteriormente, esta modelización permite la aplicación del programa a casos más generales (circulación de cualquier tipo de automóvil sobre firmes de características diversas).

El balasto se ha representado por un sistema de muelles y amortiguamientos independientes con comportamiento lineal, cuyos parámetros varían a lo largo de la longitud del puente, permitiendo modelar el efecto de incremento de rigidez debido a las traviesas.

Cada luz del puente corresponde a una viga simplemente apoyada a través de muelles y amortiguamientos no-lineales, que corresponden a los usuales apoyos de neopreno en este tipo de estructuras. La traslación vertical y el giro son los primeros grados de libertad de cada viga, permitiendo representar el descenso diferencial de los apoyos. Los siguientes grados de libertad representan la deformación por flexión del elemento y se identifican con los modos naturales de la viga biapoyada (senoidales) hasta un total definido inicialmente por el usuario. En cuanto a características geométricas, cada una de estas vigas puede ser de sección constante o variable: en este caso se supone una variación simétrica respecto al centro del vano, siguiendo una curva de segundo grado. En ambos casos se admite la posibilidad de pretensado, definido por la fuerza de tesado y la excentricidad máxima en el centro de la luz, y que se tratara en el conjunto del problema como una carga uniformemente repartida sobre la viga.

Los pilares, por el contrario, se modelan como barras planas de nudos rígidos, con seis grados de libertad, que representan los desplazamientos vertical, horizontal y giro de los dos extremos del pilar, utilizándose como funciones de interpolación los polinomios de Hermite, en la forma tradicional del Cálculo Matricial. Se considera, asimismo, la posibilidad de variación lineal del espesor.

La inclusión de grados de libertad horizontales es aquí del mayor interés pues se ha observado

su importancia en pilas esbeltas de grandes Viaductos.

El terreno que soporta a los pilares está representado por tres muelles y tres amortiguamientos no-lineales elásticos, que actúan sobre los desplazamientos vertical, horizontal y giro, respectivamente, de la base del pilar, y que corresponden a suponer un comportamiento del terreno como semiespacio elástico no-lineal.

Una vez explicado el modelo, y citada la herramienta teórica que se utiliza (método de RAYLEIGH-RITZ) para el tratamiento de elementos continuos, resulta sencilla la comprensión del sistema de ecuaciones resultante, del cual tan solo apuntaremos algunas ideas.

Se ha utilizado la aproximación de masas puntuales para cada elemento -masa- de los vehículos, así como en el balasto, ya que en caso contrario se producirían acoplamientos que harían excesivamente complejo el tratamiento de las matrices. Por el contrario, tanto la vía como las vigas y pilares están sujetas a la hipótesis de masa consistente.

Observese asimismo en el sistema de ecuaciones, que a continuación se detalla, que algunos términos están encerrados en corchetes y señalados con asteriscos (*). Ello indica que los valores de las funciones que encierran se encuentran particularizados en algún punto x.

Es interesante hacer notar la dependencia del tiempo en los términos afectados por las funciones de forma móviles.

Masa Suspendida

$$\begin{aligned}
 & M_i \ddot{\delta}_i + \sum_{l=1}^{C_i} C_{em}^{ij} (\dot{z}_e^i - \dot{z}_m^j) + \\
 & + \sum_{l=1}^{k_i} K_{em}^{ij} (z_e^i - z_m^j) = \sum_{m=1}^{M_i} P_m^i \\
 & MG_i \ddot{\alpha}_i + \sum_{l=1}^{C_i} C_{em}^{ij} (\dot{z}_e^i - \dot{z}_m^j) d_e^i + \\
 & + \sum_{l=1}^{k_i} K_{em}^{ij} (z_e^i - z_m^j) d_e^i = \sum_{m=1}^{M_i} P_m^i d_i \quad (1)
 \end{aligned}$$

Siendo:

$$z_e^i = \delta_i + \alpha_i d_e^i$$

$$z_m^j = \delta_i + \alpha_j d_m^j$$

$\ddot{\delta}_i, \dot{\delta}_i, \delta_i$ = aceleración, velocidad, desplazamiento lineal de la masa "i"

$\ddot{\alpha}_j, \dot{\alpha}_j, \alpha_j$ = aceleración, velocidad, desplazamiento angular de la masa "j"

K_{em}^{ij}, C_{em}^{ij} = rigidez, amortiguamiento del elemento número "e" de la masa "i" y número "m" de la masa "j"

d_e^i = distancia del elemento "e" sobre la masa "i" a su c.d.g.

Masa no Suspendida

$$M_i \ddot{\delta}_i + K_C [\varepsilon(x) + \delta_i - y_v]^* - K_S (\delta_j - \delta_i) + C_S (\dot{\delta}_j - \dot{\delta}_i) = P_i \quad (2)$$

Siendo:

K_C : rigidez del muelle rueda-vía

K_S, C_S : rigidez, amortiguamiento del muelle-amortiguador que une la rueda a otra masa

$\varepsilon(x)$: función que dá las irregularidades de la vía-rueda

y_v = ordenada de la vía

Vía

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n \left[\int_0^L \phi_j \left(m + \frac{m_B}{2} \right) \phi_i dx \right] \ddot{B}_i + \\ & + \sum_{i=1}^n \left[\int_0^L (\phi_j'' EI \phi_i'' + \phi_j K_B \phi_i) dx + K_S \right. \\ & \left. + \left[\sum_{l=1}^{NR} \phi_j K_C \phi_l \right]^* \right] B_i - \sum_{k=1}^m \left[\int_0^L \phi_j K_B \phi_k dx \right] \Delta_k = \\ & = \sum_{l=1}^{NR} \left[\phi_j K_C \delta_l + \phi_j K_C \varepsilon(x) \right]^* \quad (3) \end{aligned}$$

Siendo:

n = Número de grados de libertad de la vía

m = Número de grados de libertad de la viga

C = Matriz de amortiguamiento. Incluye el amortiguamiento de Rayleigh-Ritz y los términos que resultan en \dot{B} al derivar y (elástica de la viga) respecto al tiempo

NR = Número de ruedas

K_C = Rigidez del muelle ficticio rueda-vía

K_B = Rigidez del balasto

K_S = Término debido a funciones de forma dependientes del tiempo (vease fórmula 5)

Viga

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n \left[\int_0^L \psi_j \left(m + \frac{m_B}{2} \right) \psi_i dx \right] \ddot{\Delta}_i + \\ & + \sum_{i=1}^m \left[\int_0^L \psi_j C \psi_i dx \right] \dot{\Delta}_i + \\ & + \sum_{i=1}^m \left[\int_0^L (\psi_j'' EI \psi_i'' + \psi_j K_B \psi_i) dx + \right. \\ & \left. + \left[\psi_j K_k \psi_i \right]^* \right] \Delta_i - \sum_{l=1}^n \left[\int_0^L \psi_j K_B \phi_l dx \right] B_l = \\ & = - \left[\psi_j K_k \delta \right]^* \quad (4) \end{aligned}$$

Siendo:

K_k = Rigidez del neopreno

PROCESO GENERAL DE CALCULO

Visto, siquiera sea a grandes rasgos, el modelo matemático utilizado y el sistema que de él se deriva, se van aquí a explicar brevemente los principales problemas que se presentan, así como a dar una idea del proceso general de cálculo.

El primero y quizás más importante de estos problemas es la propia complejidad de la formulación.

Efectivamente, al desarrollar el sistema planteado, y dado que algunas de las funciones de forma elegidas dependen del tiempo, su derivada respecto a este, da lugar a gran cantidad de aportaciones.

Si por ejemplo se considera el término correspondiente a las fuerzas de inercia de la vía:

$$\begin{aligned} & \int_0^L \phi_i m y dx \\ & Y se sustituye "y" por su desarrollo, resulta: \\ & \left[\int_0^L \phi_i m \ddot{\phi}_j dx \right] B + 2 \left[\int_0^L \phi_i m \dot{\phi}_j dx \right] \dot{B} + \\ & + \left[\int_0^L \phi_i m \phi_j dx \right] \ddot{B} \quad (5) \end{aligned}$$

Lo cual tiene, evidentemente dos consecuencias inmediatas:

- Las matrices pierden su sentido físico. Observe como términos en masa pasan a formar parte de las matrices de rigidez y amortiguamiento.

- La formulación se complica.

Adviertase además que, en general, estos términos varían con el tiempo.

Así, por ejemplo, las funciones de forma correspondientes a la deformación local de la vía al paso de la rueda, por trasladarse acompañando a esta, harán variable cada término en que aparezcan multiplicadas por funciones de forma estacionarias.

Ello implica que todos estos términos han de ser calculados en cada paso.

Como forma de integración se ha escogido un método paso a paso, el de la aceleración media, por tratarse de un método incondicionalmente estable, convergente, y simple, si bien, la convergencia resulta más lenta que en otros algoritmos.

Para su utilización, y en primer lugar, se escribe el sistema en su forma incremental.

Ello permite suponer - con ciertas correcciones - un modelo lineal en cada paso de integración.

Las correcciones mencionadas surgen, de la consideración de los elementos no lineales del modelo (muelles, amortiguamientos, topes, etc.) así como de la propia configuración de este.

Considerandose un elemento con curva característica la de la Fig. 5

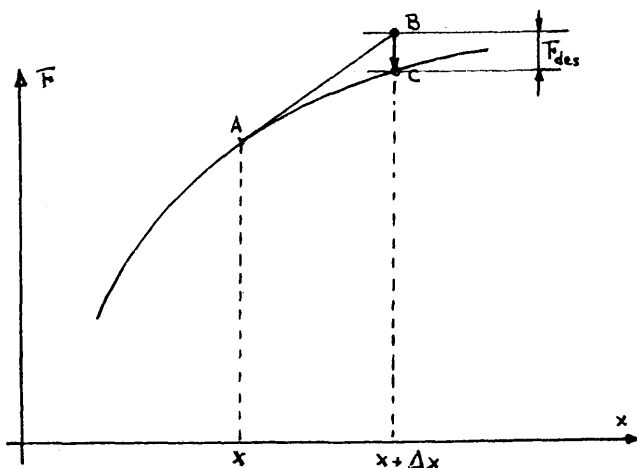


Fig. 5

Si se parte del punto "A" y se aproxima por la tangente, se llega al final del paso de integración en el punto "B".

Si ahora se pretende ajustar el sistema, es to es, pasar al punto real "C", se tiene que

- Sustituir la fuerza resultante en cada elemento no lineal por la que realmente le corresponde.

- Introducir, para mantener el equilibrio, esa diferencia de fuerzas en el vector de cargas.

- Comenzar la siguiente iteración en el punto "C".

La no linealidad inherente al sistema resulta clara al observar la Fig. 6

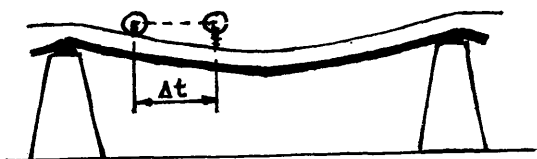


Fig. 6

El acoplamiento entre la rueda y la vía se efectúa a través del tope Kc de la figura.

Entre dos posiciones consecutivas de la rueda, "t" y "t + Δt", la longitud del muelle se ha incrementado por dos causas:

- El incremento de la coordenada "B" asociada a la propia función de forma.

- La diferencia entre las ordenadas (x, t) y (x + Δx, t) de la función de forma correspondiente a distintas abscisas "x" y "x + Δx".

El intervalo de integración se mantiene constante a lo largo de todo el proceso, y es un dato de entrada. En el futuro, sin embargo se prevé la posibilidad de variación automática de dicho intervalo, lo que permitirá aumentar la densidad de puntos de integración allá donde las características del sistema se aparten más de la linealidad (Por ejemplo, el momento del rebote de una rueda con el consiguiente despegue de la vía).

En lo que al proceso en si se refiere, consta fundamentalmente de dos partes claramente diferenciadas:

- Una primera parte estática.
- Una segunda de cálculo dinámico del conjunto.

La parte estática tiene un fin doble:

- Obtener la posición de equilibrio, ya que, todas las coordenadas del sistema se refieren finalmente a esta posición de equilibrio.

- Obtener la situación de cada elemento no lineal. Esto es, saber, para el instante inicial de integración, en que punto de la curva característica de cada elemento no lineal se encuentra el proceso.

Esta parte del programa consiste en un proceso iterativo doble de resolución del sistema:

$$\tilde{K} \Delta \tilde{x} = \Delta \tilde{P}$$

Para el tren por un lado y para el puente por otro.

En cada paso se obtiene un nuevo valor de "x" que, llevado a la curva característica de cada elemento no lineal, da las ya mencionadas fuerzas de equilibrio.

Estas fuerzas se introducen en el vector de cargas correspondiente a la siguiente iteración, se obtiene la nueva matriz de rigidez.

Se alcanza el final cuando el vector de cargas es suficientemente pequeño.

En el proceso dinámico, cada paso de integración consta de los siguientes apartados:

- Cálculo de las nuevas matrices "K" y "C", correspondientes al instante inicial del paso.

- Obtención del vector de cargas correspondiente. Incluirá la posible variación de las fuerzas exteriores aplicadas y los términos deri

vados de las irregularidades de la vía.

- Cálculo, mediante el proceso de predicción - corrección, de los nuevos valores de " $\Delta\ddot{x}$ ", " $\Delta\dot{x}$ ", " Δx ".

- Almacenamiento en fichero de " \ddot{x} ", " \dot{x} ", " x ".

- Cálculo de las fuerzas de desequilibrio e introducción de estas en el vector de cargas, correspondiente al instante siguiente.

Del simple enunciado de las operaciones a realizar en cada paso de integración se desprende que se trata de un programa lento y complejo.

Si bien es cierto que ello contradice uno de los objetivos inicialmente propuestos no lo es menos que resulta inevitable dada la amplitud del modelo.

DESCRIPCION DEL PROGRAMA

El programa que se presenta en este trabajo, consta de aproximadamente 10000 sentencias, ha sido implementado en un UNIVAC 1108 y se encuentra escrito en FORTRAN V.

La propiedad fundamental del programa, es la modularidad. Se compone de un número de grandes subrutinas independientes controladas por un módulo principal, que se encarga de la dirección del proceso de ejecución. Entre las muchas ventajas que se deducen de este esquema, son destacables las siguientes:

- Superposición de módulos durante la ejecución, mediante un proceso de segmentación, con el consiguiente ahorro de memoria.

- Flexibilidad durante la ejecución, facilidad de chequeo y posibilidad de ampliación con un trabajo mínimo.

El módulo principal esta compuesto por el programa principal y una subrutina maestra de nombre MASTER, que define los tamaños de memoria principal y auxiliar necesarios, abre los ficheros y encadena los diferentes módulos de proceso. Este segmento permanece en memoria, junto a una serie de subrutinas auxiliares, que se utilizan a lo largo de todo el programa. Por el contrario los otros segmentos se introducen uno a uno, con el objeto de salvar memoria principal. Estos segmentos de proceso son:

- Entrada y definición de datos.
- Cálculo estático del conjunto.
- Cálculo dinámico del sistema.
- Salida de resultados.

Existen una serie de subrutinas generales, principalmente para el manejo de datos, como se detalla a continuación. Un esquema del diagrama de flujo del proceso puede verse en la Fig. 7.

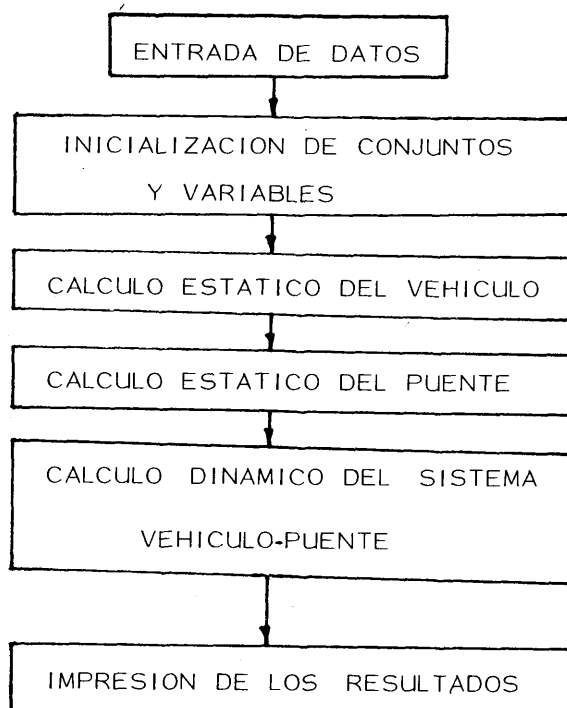


Fig. 7

En cuanto al tratamiento de los datos del problema, se ha realizado el conjunto del proceso en memoria principal, mediante una utilización particular del conocido concepto de "almacenamiento dinámico". Con él, es posible obtener un manejo óptimo del área de memoria dedicada a los datos.

Asimismo, con el objeto de conseguir una mayor flexibilidad, se ha creado un paquete de subrutinas que ayudan a crear, borrar y localizar un determinado conjunto, dentro del área global de trabajo, de una forma fácil, en el punto de

la ejecución deseado.

CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un programa de ordenador de amplias posibilidades que resuelve el problema de interacción dinámica vehículo-vía-estructura-cimiento en puentes de ferrocarril.

Se aborda este caso mediante una modelización general de los distintos tipos de elementos (masa, muelles, amoriguamientos, fricción, tope, etc.), que constituyen los vehículos, incluyendo la posibilidad de elementos no-lineales y elásticos. Asimismo, se emplea una forma original de tratamiento del sistema vía-balasto incluyendo efectos locales y deformaciones globales, a través de una serie de funciones de forma, consistentes con la deformación global del puente y el modelo de balasto elegido.

El conjunto de vigas-soportes se estudia como elementos de barra a través de la formulación de Cálculo Matricial, considerando como funciones de forma los distintos modos dinámicos de movimiento de tales elementos.

La formulación final obtenida es totalmente general y permite un amplio estudio paramétrico del problema, que se plantea para una segunda fase.

El programa de ordenador obtenido tiene como características principales la modularidad, un fácil chequeo y la probabilidad, lo que facilita la posibilidad de ampliación con un mínimo esfuerzo.

Se ha desarrollado también una estructura de datos, cuyas características más importantes son: una reducción máxima de memoria, mediante la utilización de un proceso de segmentación, y un procedimiento de almacenamiento de matrices, que consigue obviar la mayoría de los elementos nulos de estas matrices. Se utiliza asimismo un esquema de chequeo, consistente en una serie de subrutinas de impresión individualizadas, que permiten conocer, de forma inmediata la situación de un conjunto de cualquier punto del programa.

NOTA ADICIONAL

Este programa ha constituido la aportación de la Catedra de Estructuras de la E.T.S.I.I. de la U.P.M al concurso internacional (limitado a cuatro invitaciones) que, sobre "Limitación de Flecha en Puentes de Ferrocarril por la Confortabilidad del Viajero", ha promovido la Oficina de Investigaciones y Ensayos (ORE) de la Union Internacional de Ferrocarriles (UIC).

REFERENCIAS

1. S.P. Timoshenko and D.H. Young. "Vibration - Problems in Engineering" 3rd. Edition. Van Nostrand 1975
2. J.M. Biggs. "Introduction to Structural Dynamics", Mc Graw-Hill 1964
3. R.W. Clough and J. Penzien. "Dynamics of Structures", Mc Graw-Hill 1975
4. K.J. Bathe and E.L. Wilson. "Numerical Methods in Finite Element Analysis". Prentice-Hall 1966
5. Sub-Committees on Impact. "Report of the American Railway Engineering Association", Proc. of ARA/ 1911.
6. T.G. Charles. "High Speed Computer Applied to Bridge Impact". Proc. ASCE. ST 5/ 1958
7. J.F. Fleming and J.P. Romualdi. "Dynamic Response of Highway Bridges". Proc. ASCE. ST 7/ 1961
8. ORE. Question D 23. "Determination of Dynamic Forces in Bridges". Report N.7-N.17/ 1957-1970
9. Andre Winand. "Effects Dynamiques sur les Tabliers des Ponts". IABSE/ 1968
10. L. Fyba. "Impact of Two Axle System Traveling a Beam". Inst. J. Solids Structures. Vol 4/ - 1960
11. ORE, Question D 128. "Statistical Distribution of Axle Loads and Stress in Railway Bridges". Report N. 3-4/ 1975-1976, N. 10/ 1980
12. F. Itoh et al. "Runnability of Train on Long-Spanned Suspension Bridges". Research Committee on Runnability. 1978
13. Y. Yasoshima, Y. Matsumoto and T. Nishioka. "Studies on the Running Stability of Railway Vehicles on Suspension Bridges" J. of the Faculty of Engineering. University of Tokyo. Vol. XXXVI N.1/ 1981
14. W. Kortum and D.N. Wormley. "Dynamic Interaction between Travelling Vehicles and Guideway Systems". Vehicle System Dynamics. Vol. 10, - N. 4-5/ 1981
15. A. Matsuura. "Outline of Guideway in Miyazaki Test Truck of Levitated Transportation". JREA Vol. 19, N.1/ 1979
16. W. Duffek, W. Kortum and D. Wallrapp. "A general Purpose Program for the Simulation of Vehicle-Guideway Interaction". Dynamics Proceedings of the 5th. Vehicle System Dynamics. - 2nd. IUTAM Symposium. Wien 1977. S. 104-126

17. W.H. Park, D.J.C. Wanbold and R.G. Vashlis-
han. "Prediction of Objective Passenger Com-
fort form/road Profile". J. of Engineering_
for Industry. May 1974. S. 503-507
18. N. Anantharayana. "Dynamic Response of Rail
way Bridges". The Bridge an Structural Engi
ne. Vol. 6.Nr 4 December 1976. s. 21-52
19. E. Alarcon. "Efectos Dinámicos en los Puen-
tes". Tesis Doctoral. E.T.S.C.C.P. Diciem -
bre 1970